

# Kennzahlen zur Betriebsoptimierung von Kesselanlagen

Jost Sternberg und Sven Gose

1.	Unterschiedliche Typen und Betriebsprofile von Wärmeerzeugern.....	247
2.	Kennzahlen für einzelne Betriebsgrößen.....	248
3.	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad, Kesselwirkungsgrad, Brennstoffnutzungsgrad.....	252
4.	Konventionelle Energieeinsparmöglichkeiten.....	255
5.	Energieeinsparmöglichkeiten durch eine Optimierung der Regelung.....	258
6.	Beispiele von Energieeinsparmöglichkeiten.....	260
7.	Fazit .....	261

Nach Schätzungen des BDH sind heute in Deutschland etwa 30.000 Kesselanlagen mit Leistungen oberhalb von 1 MW Leistung für die Erzeugung von Wärme und Dampf installiert. Zusammengenommen haben diese Anlagen einen nennenswerten Anteil am Primärenergieverbrauch in Deutschland. Sie werden jedoch wegen unterschiedlicher Anforderungen an den Wärmebedarf nur zu einem geringen Anteil kontinuierlich betrieben, so dass für eine zielgerichtete energetische Optimierung auch das Betriebsverhalten berücksichtigt werden muss. Wie im Folgenden dargestellt, ist das Verhältnis von Aufwand und Nutzen bei energetischer Optimierung der Wärmeerzeuger sehr stark von den tatsächlichen Betriebsbedingungen abhängig. So sind zum Beispiel aufwändigere Maßnahmen wie Abgaswärmetauscher und Luftvorwärmung nur bei Anlagen mit hohen Betriebszeiten kommerziell sinnvoll. Andere Maßnahmen wie die Nachrüstung einer Drehzahlregelung für Gebläse und Pumpen zahlen sich dagegen auch für Anlagen aus, die häufig in Teillast betrieben werden. Bei Anlagen die häufig im unteren Leistungsbereich betrieben werden, kann die Erweiterung des Regelbereichs die Effizienz der Feuerung zusätzlich steigern.

## 1. Unterschiedliche Typen und Betriebsprofile von Wärmeerzeugern

Das individuelle Betriebsprofil des Wärmeerzeugers ist ein entscheidendes Kriterium, um den kommerziellen Nutzen einer Optimierung bewerten zu können. Dabei ist dieses Betriebsprofil stark vom nachgeschalteten Prozess abhängig. Es gibt zwei grundlegende Typen von Kesseln: Heißwasserkessel und Dampfkessel. Während Heißwasserkessel nur Wärme bereitstellen, dienen Dampfkessel sowohl der Wärme- als auch der Prozessdampfbereitstellung. Diese unterschiedlichen

Verwendungszwecke ziehen Betriebsprofile nach sich, die sich stark unterscheiden können. Bei Heißwasserkesseln kommt es in der Regel zu starken saisonalen Schwankungen, während sich die täglichen Schwankungen in Grenzen halten: so läuft ein Heißwasserkessel im Sommer möglicherweise gar nicht, im Winter hingegen unter Vollast. Im Gegensatz dazu werden Dampfkessel mit sehr unterschiedlichen Betriebsprofilen gefahren – es gibt Anlagen, die nur wenige Stunden am Tag eine Spitzenlast abdecken müssen (z.B. Prozessdampf Lebensmittelindustrie), aber auch Anlagen die kontinuierlich betrieben werden. Bild 1 gibt eine Übersicht über die Einteilung von Wärmeerzeugern.

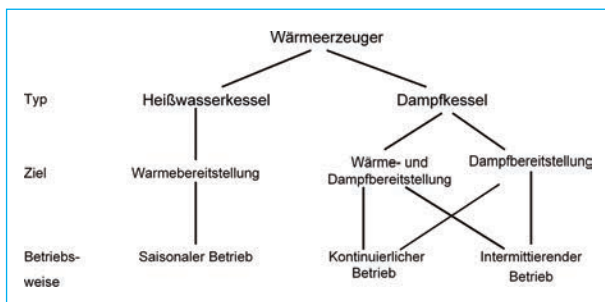


Bild 1: Einteilung von Wärmeerzeugern

Durch Umbaumaßnahmen oder andere Optimierungen kann die Wirtschaftlichkeit einer großen Anzahl der in Deutschland betriebenen Wärmeerzeugungsanlagen signifikant verbessert werden. Allerdings müssen diese Maßnahmen individuell auf den Wärmeerzeuger abgestimmt sein – das spezifische Betriebsprofil der Anlage ist hier entscheidend.

Um abschätzen zu können, welche Maßnahme den größten wirtschaftlichen Nutzen bringt, existieren eine Reihe von Kennzahlen, die jedoch die Energieströme unterschiedlich bilanzieren. So spiegelt z.B. die allgemein geläufige Kennzahl des Feuerungstechnischen Wirkungsgrads den Einfluss des Betriebsprofils nicht ausreichend wider. In der Folge können Investitionsentscheidungen falsch sein. Für eine fundierte Abschätzung sind also weitere Kennzahlen notwendig, die allerdings nur durch technische Hilfsmittel ermittelt werden können.

## 2. Kennzahlen für einzelne Betriebsgrößen

Wie allgemein bekannt, müssen für die vollständige Bilanzierung (also für die Gegenüberstellung von Aufwand und Nutzen) eines Wärmeerzeugers die ein- und austretenden Energieströme kontinuierlich gemessen werden. Da dies bislang recht aufwändig war, wurden vereinfachte Berechnungsverfahren verwendet, die allerdings nicht alle auftretenden Verluste mit einbeziehen.

Bild 2 stellt die Energieströme eines Wärmeerzeugers dar. Die eintretenden Energieströme sind die elektrische Energie für das Verbrennungsluftgebläse sowie die Enthalpien des Brennstoffs und der Verbrennungsluft. Der Nutzen ist der austretende Dampf- oder Heißwasserenthalpiestrom. Die auftretenden Verluste teilen sich auf in Abgas- und Durchlüftverluste, Verluste durch Speisewasser, Oberflächenverluste und elektrische Verluste.

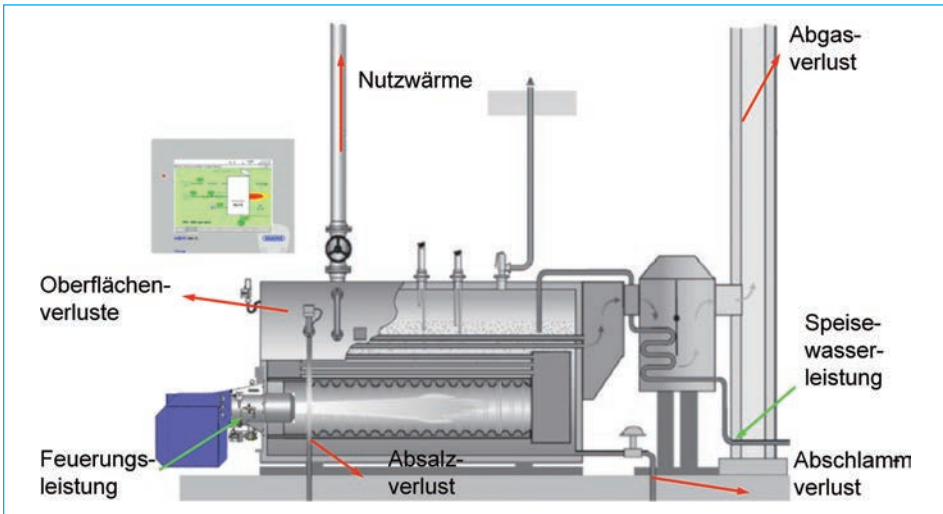


Bild 2: Energieströme einer Kesselanlage

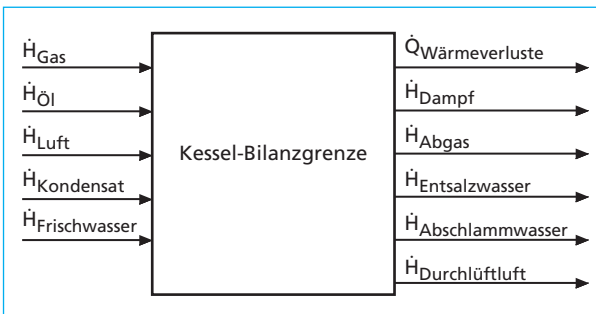


Bild 3: Energiebilanz um eine Kesselanlage

Die Abgasverluste hängen von der Abgasmenge und von der Abgastemperatur ab. Um diese Verluste zu minimieren, können Abgasmenge und/oder Abgastemperatur reduziert werden. Für die Reduktion der Abgastemperatur bieten sich Wärmetauscher an. Zur Reduzierung der Abgasmenge muss die Verbrennung optimal gestaltet werden, so dass der Luftüberschuss möglichst niedrig liegt. Die Abgasverluste lassen sich nach der 1. BImSchV mit folgender Formel berechnen, wobei A und B brennstoffspezifische Werte sind:

Durch diese Formel lassen sich Anhaltswerte ableiten:

$$X_A = \left( \frac{A}{21 - O_{2, \text{tr}}} + B \right) \cdot (\vartheta_A - \vartheta_L) \text{ in } \%$$

Beispielsweise reduziert eine Maßnahme, die den Sauerstoffgehalt im Abgas um ein Prozent senkt, die Abgasverluste um etwa 0,5 Prozent. Wird die Abgastemperatur um 100 K verringert, sinken die Abgasverluste um etwa vier Prozent. In Bild 4 lässt sich der Einfluss der Abgastemperatur und des Luftüberschusses auf den Feuerungstechnischen Wirkungsgrad ablesen.

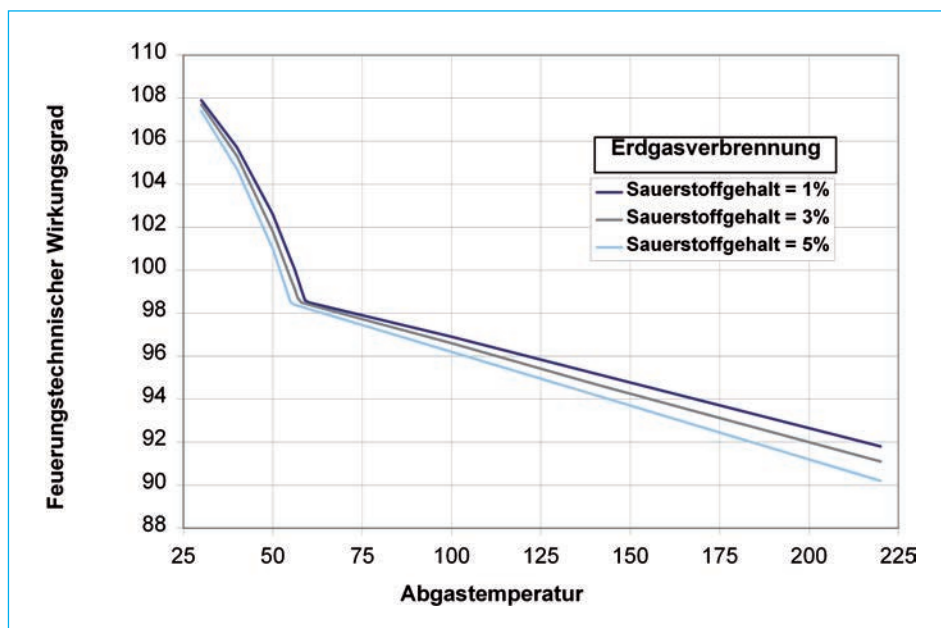


Bild 4: Einfluss der Abgastemperatur auf den Wirkungsgrad

Durchlüftverluste, fallen bei jedem Start an, und hängen von der Kesseltemperatur und der Länge der Durchlüftphase ab. Ein 10 MW-Dampfkessel hat beispielsweise pro Startvorgang Abgasverluste von etwa 30 kWh. Im intermittierenden Betrieb können deshalb beachtliche Verluste von 2 MWh pro Tag entstehen. Da das Durchlüften aus Sicherheitsgründen notwendig ist, muss hier eine Alternativlösung gefunden werden, die weniger Startvorgänge (und damit automatisch auch weniger Durchlüftphasen) erforderlich machen. Hier bietet sich eine Erweiterung des Brennerregelbereiches oder eine Optimierung der Reglereinstellungen an:

$$X_D = \dot{V}_L \cdot \rho_L \cdot t_{\text{Durchlüft}} \cdot n_{\text{Durchlüft}} \cdot c_{p,L} \cdot \vartheta_K$$

Speisewasserverluste entstehen durch Ausschleusen des Speisewassers aus dem Kessel. Dies ist zum einen notwendig, um eine zu starke Belastung des Kessels mit Salzen zu verhindern (*Absalzen*). Zum anderen muss der so genannte *Schlamm* regelmäßig vom Kesselboden entfernt werden (*Abschlamm*). Hier sind die Menge (Bild 5) und die Temperatur des ausgeschleusten Kesselwassers bestimmende Größen der Verluste.

Abschlammverluste können durch eine Optimierung der Abschlammintervalle und der Öffnungszeiten des Abschlammentils vermindert werden.

Die Höhe der Absalzverluste hängt von der Menge des frischen Speisewasser und von dessen Qualität ab. Je höher die Qualität des frischen Speisewassers (heißt: je niedriger der Salzgehalt), desto weniger Kesselwasser muss für den

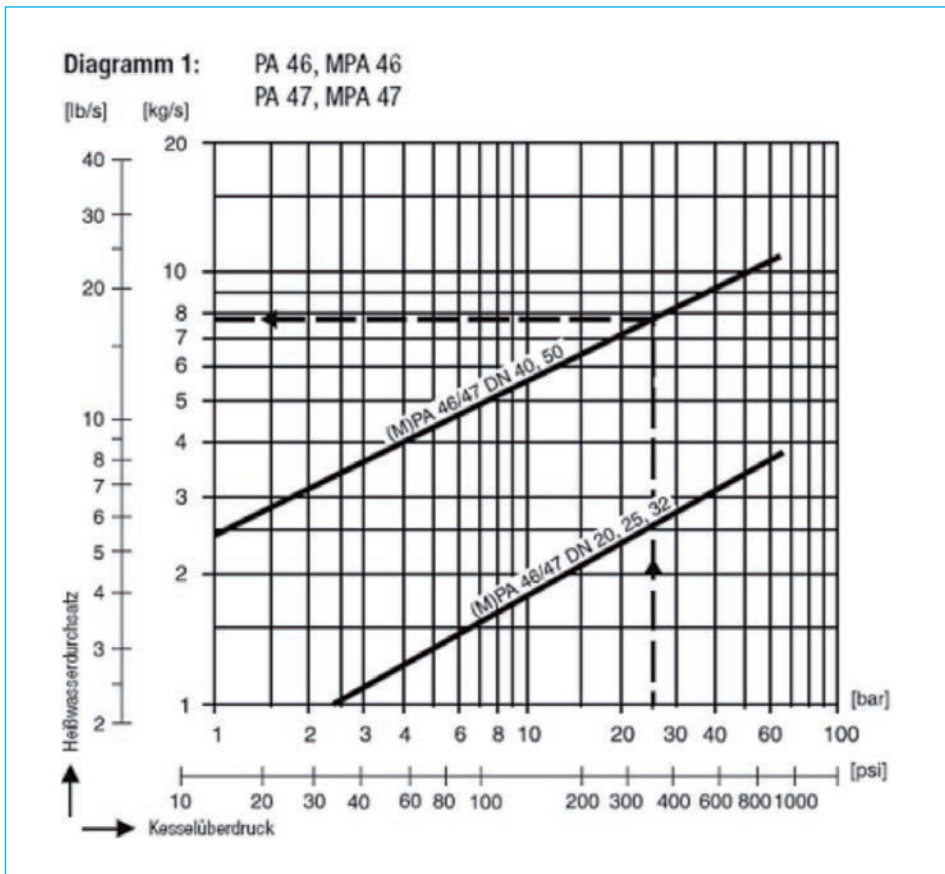


Bild 5: Durchflussmenge eines Abschlammentils

Absalzvorgang ausgeschleust werden: Qualitativ hochwertiges Speisewasser spart große Mengen an Energie. Um den Salzgehalt des Kessels nicht über eine kritische Schwelle steigen zu lassen, muss beispielsweise eine Tonne Kesselwasser ausgeschleust werden, wenn zehn Tonnen frisches Speisewasser mit einer Leitfähigkeit von 400  $\mu\text{S}$  zugeführt wurden.

$$\dot{m}_{\text{Absalz}} = \frac{\dot{m}_{\text{Speisewasser}} \cdot L_{\text{Speisewasser}}}{L_{\text{Kessel, max}}}$$

Die Menge des Speisewassers hängt von der Prozessführung ab, genauer gesagt von der Menge an Dampf, die durch einen nachgelagerten Prozess verbraucht wird. Somit lässt sich anhand des Prozesses bestimmen, welche Speisewassermengen nachgeführt werden müssen.

$$\dot{m}_{\text{Speisewasser}} = \frac{1}{1 - R_{\text{FF}}} ((1 - R_{\text{R}}) \cdot \dot{m}_{\text{Dampf}} + \dot{m}_{\text{Abschlamm}})$$

Die Oberflächenverluste einer Kesselanlage entstehen durch Strahlungs-, Konvektions- und Leitungsvorgänge mit der Umgebung. Um diese Verluste zu minimieren, muss der Kessel gut isoliert werden. Außerdem sollten Wärmebrücken, z.B. durch unisolierte Mannlöcher, vermieden werden. Für gut isolierte Kessel liegen die Oberflächenverluste bei unter einem Prozent. Die Oberflächenverluste durch Strahlung und Konvektion berechnen sich vereinfacht folgendermaßen:

$$\dot{Q}_0 = A_K (\alpha \cdot (\vartheta_K - \vartheta_U) + \epsilon_0 \cdot \epsilon_r (T_K^4 - T_U^4))$$

Der Motor des Verbrennungsluftgebläses verbraucht die größte Menge elektrischer Energie einer Feuerungsanlage. Hier lassen sich durch die Verwendung einer Drehzahlregelung signifikante Energieeinsparungen erzielen – solange der Motor nicht betriebsbedingt permanent in der Nennlast laufen muss. Bild 6 zeigt anschaulich, dass mit einem drehzahlgeregelten Gebläse gerade im Teillastbereich eine große Menge der elektrischen Energie eingespart werden kann.

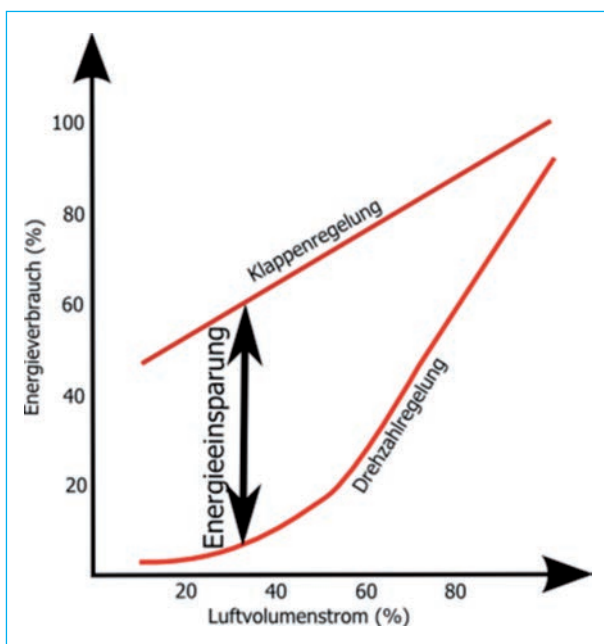


Bild 6:

Gegenüberstellung einer Klappen- und Drehzahlregelung

Bei den oben genannten Verlustarten ist auffällig, dass einige dieser Verluste nur während des Betriebes auftauchen (Abgasverluste, Absalzverluste, elektrische Verluste des Gebläsemotors), während die Oberflächenverluste auch während der Stillstandszeiten und die Durchlüftverluste nur während der Startvorgänge auftreten.

### 3. Feuerungstechnischer Wirkungsgrad, Kesselwirkungsgrad, Brennstoffnutzungsgrad

Zur Beurteilung des Betriebsprofils von Kesselanlagen wird üblicherweise der Feuerungstechnische Wirkungsgrad des Kessels, verwendet – so, wie wir diesen

auch aus der Haustechnik kennen. Gemäß der Definition in der 1. BImSchV sind die relevanten Größen zur Bestimmung des Feuerungstechnischen Wirkungsgrads die Brennstoffkennwerte, der Sauerstoffgehalt im Abgas, die Abgastemperatur und die Lufttemperatur:

$$\eta_{FT} = 100 \% - X_A - 2 \%$$

Der Ferungstechnische Wirkungsgrad kann deshalb zwar, einen kontinuierlich arbeitenden Wärmeerzeuger vergleichend beschreiben, liefert jedoch bei dynamisch betriebenen Anlagen keine belastbaren Werte. Des Weiteren bleiben Oberflächenverluste, elektrische Verbräuche und auch der gesamte Bereich der Speiswasserqualität und -aufbereitung komplett unberücksichtigt.

Auch der Kesselwirkungsgrad beschreibt nur einen Teil der auftretenden Energieströme:

$$\eta_K = 100 \cdot \frac{(\dot{m}_{\text{Speiswasser}} - \dot{m}_{\text{Abschlamm}}) \cdot (h_{\text{Dampf}} - h_{\text{Speiswasser}})}{\dot{m}_{\text{Br}} \cdot H_{\text{Br}}}$$

Auch hier werden z.B. Absalzverluste nicht berücksichtigt, so dass auch keine Aussage zum wirtschaftlichen Nutzen einer verbesserten Speiswasseraufbereitung getroffen werden kann.

Für eine vollständige Bilanzierung einer Kesselanlage ist es deshalb unumgänglich, ein kontinuierliches Monitoring der entscheidenden Energieströme durchzuführen. Erst diese Gegenüberstellung führt zum Brennstoffnutzungsgrad, der über eine Zeitspanne hinweg angegeben werden muss. Ein solches, kontinuierliches Monitoring ist allerdings nur möglich, wenn an der Kesselanlage eine entsprechende Mess- und Auswerte-Hardware installiert wird.

$$\begin{aligned} \eta_{\text{Br}} &= \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\sum_0^n \dot{H}_{\text{Dampf}}}{\sum_0^n \dot{H}_{\text{Br}} + \dot{H}_{\text{Luft}}} \\ &= \frac{\text{Aufwand-Verluste}}{\text{Aufwand}} = \frac{\sum_0^n (\dot{H}_{\text{Br}} + \dot{H}_{\text{Luft}} - \dot{H}_{\text{Absalz}} - \dot{H}_{\text{Abschlamm}} - \dot{H}_{\text{Durchlüft}} - \dot{Q}_0)}{\sum_0^n (\dot{H}_{\text{Br}} + \dot{H}_{\text{Luft}})} \end{aligned}$$

Bild 7 vergleicht beispielhaft die genannten, unterschiedlichen Wirkungsgrade miteinander in Abhängigkeit von der relativen Nutzleistung des Wärmeerzeugers. Man erkennt hier deutlich, dass der Brennstoffnutzungsgrad immer unter dem Kesselwirkungsgrad liegt, der wiederum niedriger als der Feuerungstechnische Wirkungsgrad ist. In diesen Verläufen spiegelt sich die Tatsache wider, dass die drei genannten Nutzungsgradbetrachtungen einige Verlustarten unterschiedlich betrachten. Zudem erklärt sich der unterschiedliche Kurvenverlauf auch mit Strahlungsverlusten, die, relativ gesehen, bei geringerer Auslastung des Kessels steigen.

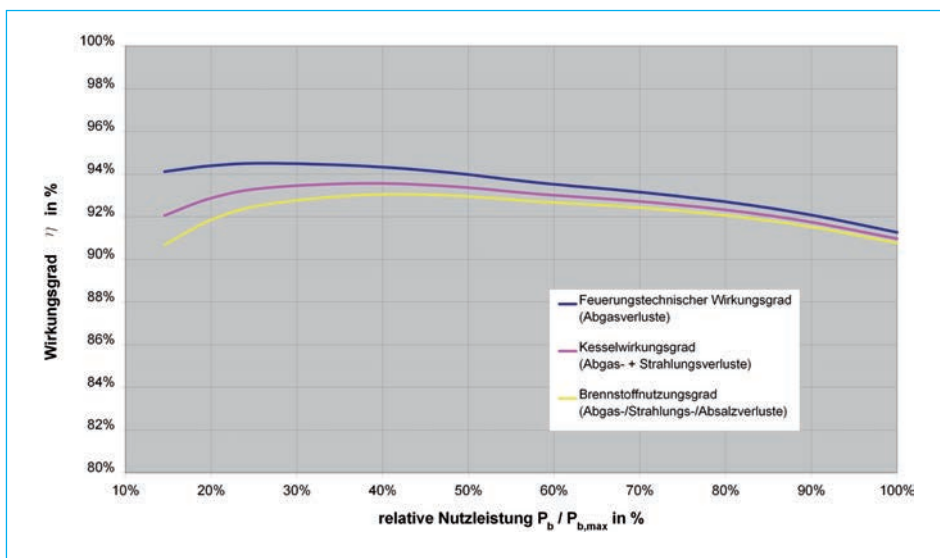


Bild 7: Gegenüberstellung verschiedener Wirkungsgrade

Die Tabelle 1 zeigt, welche Größen bei den einzelnen Wirkungsgradberechnungsmethoden berücksichtigt werden und welche nicht.

Tabelle 1: Vergleich der Wirkungsgrade

	thermischer Wirkungsgrad	Kesselwirkungsgrad	Brennstoffnutzungsgrad
Abgasverluste nach Siegert (Abgastemperatur und O <sub>2</sub> -Gehalt)	X	X	X
Strahlungsverluste		X	X
aufgewandte Wärmemenge zur Entgasung (Fegedampf)			X
benötigte Wärme zur Erwärmung des Frischwassers			X
Absalz- und Abschlammverluste			X
Verluste beim Durchlüften			X
Betrachtung in Beharrungszustand	X	X	
Berücksichtigung dynamischer Betriebsweisen			X



## 4. Konventionelle Energieeinsparmöglichkeiten bei Kesselanlagen

Unterschiedliche Betriebsarten der Wärmeerzeuger erfordern unterschiedliche Strategien der Anlagenoptimierung. Beispielsweise ist die Wirtschaftlichkeit der Installation eines Economizers abhängig von der Zeit, in der die Anlage (im Volllastbetrieb) läuft. In Tabelle 2 sind typische Betriebsprofile zusammengefasst. Dabei werden die konventionellen Energieeinsparmaßnahmen diesen Betriebsprofilen gegenübergestellt und deren wirtschaftlicher Nutzen bewertet.

Tabelle 2: Einsatzmatrix verschiedener Modernisierungsoptionen

Last/ Betriebs- weise	Inter- mittie- render Betrieb Kleinlast	Inter- mittie- render Betrieb Volllast	wechselnde Betriebs- weise (Woche – Wochen- ende)	kontinuier- licher Betrieb Kleinlast	wechselnder Betrieb mittlere Last	kontinuier- licher Betrieb mittlere Last	wechselnder Betrieb Volllast	kontinuier- licher Betrieb Volllast
Economizer	–	+	–	0	+	+	++	++
O <sub>2</sub> -Regelung	–	0	0	0	++	++	++	+
CO-Regelung lung –	0	0	0	++	++	++	+	
drehzahl- geregeltes Gebläse	++	++	++	++	+	+	+	0
Durchluft- unter- drückung	+	+	+	0	0	–	0	–
Absalz- regelung	++	+	+	++	+	+	0	0
Optimie- rung der Brenner- steuerung	++	++	++	++	+	+	0	0
Effizienzsteigerung/ Investition	sehr gut		profi- tabel	vorteil- haft	nicht zu empfehlen			
	++		+	0	–			

### Minimierung der Abgasverluste

Ein Weg zur Minimierung der Abgasverluste besteht darin, die Temperatur des Abgases mithilfe von Wärmetauschern zu senken. Hierbei können, falls notwendig, auch mehrere Wärmetauscher hintereinander geschaltet werden. Da das Temperaturniveau mit jedem weiteren Wärmetauscher sinkt, erfordert dies jedoch eine intelligente Verschaltung. Bild 8 zeigt das Beispiel einer geschickten Verschaltung. Durch die besonders geringe Abgastemperatur wird sogar eine Brennwertnutzung möglich.

Bei einer Luftvorwärmung wird ein Teil der Abgasenthalpie genutzt, um in einem Luft/Luft-Wärmetauscher die Verbrennungsluft vorzuwärmen. Bild 9 zeigt eine mögliche Verschaltungsweise eines solchen Systems.

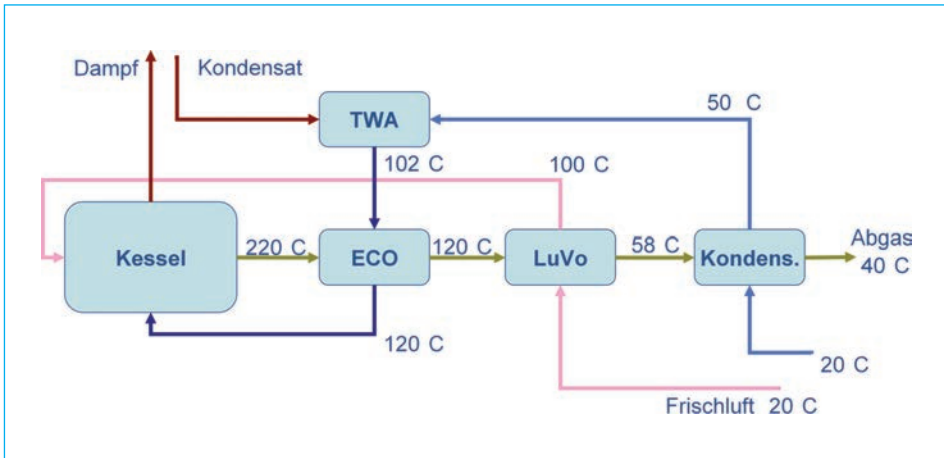


Bild 8: Temperaturniveaus und Verschaltung einer optimierten Kesselanlage

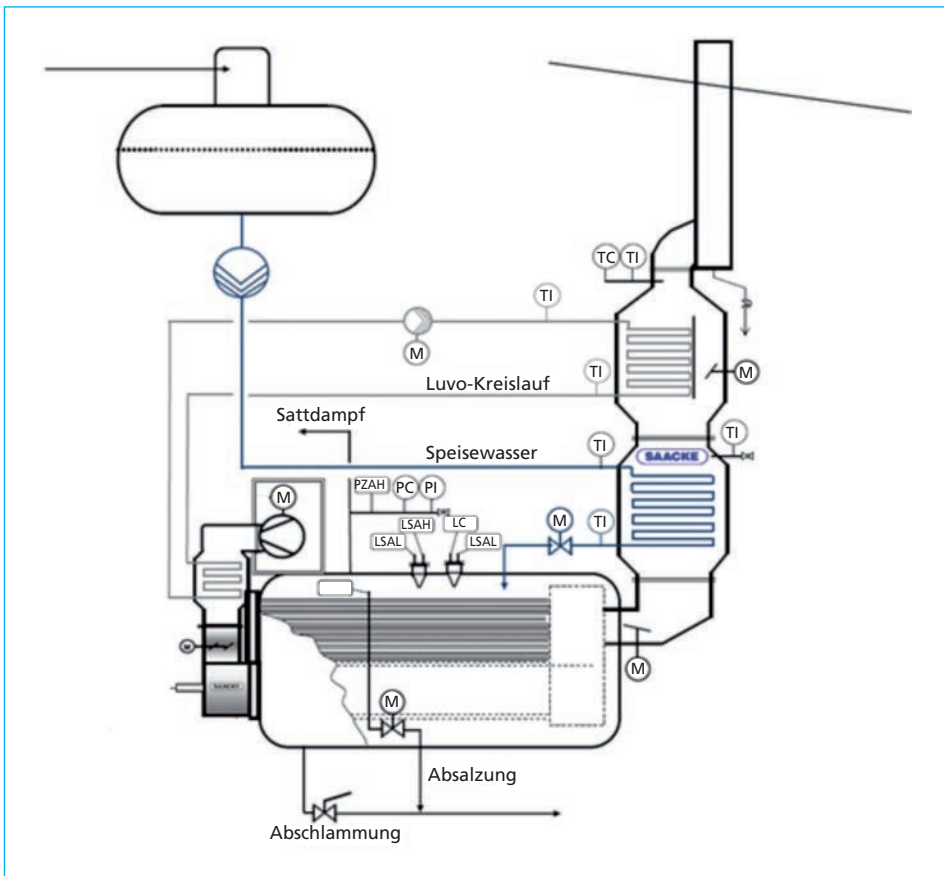


Bild 9: Abwärmenutzung Economiser und Luftvorwärmung

Bild 10 zeigt alternativ eine Speiswasservorwärmung. Da das Speiswasser mit einer recht geringen Temperatur in den Wärmetauscher eintritt, kann der Abgasstrom unter die Kondensationstemperatur des enthaltenen Wasserdampfes (bei Erdgasfeuerungen etwa 60 °C) abgekühlt werden. So lässt sich ein Teil der Kondensationsenthalpie nutzen.

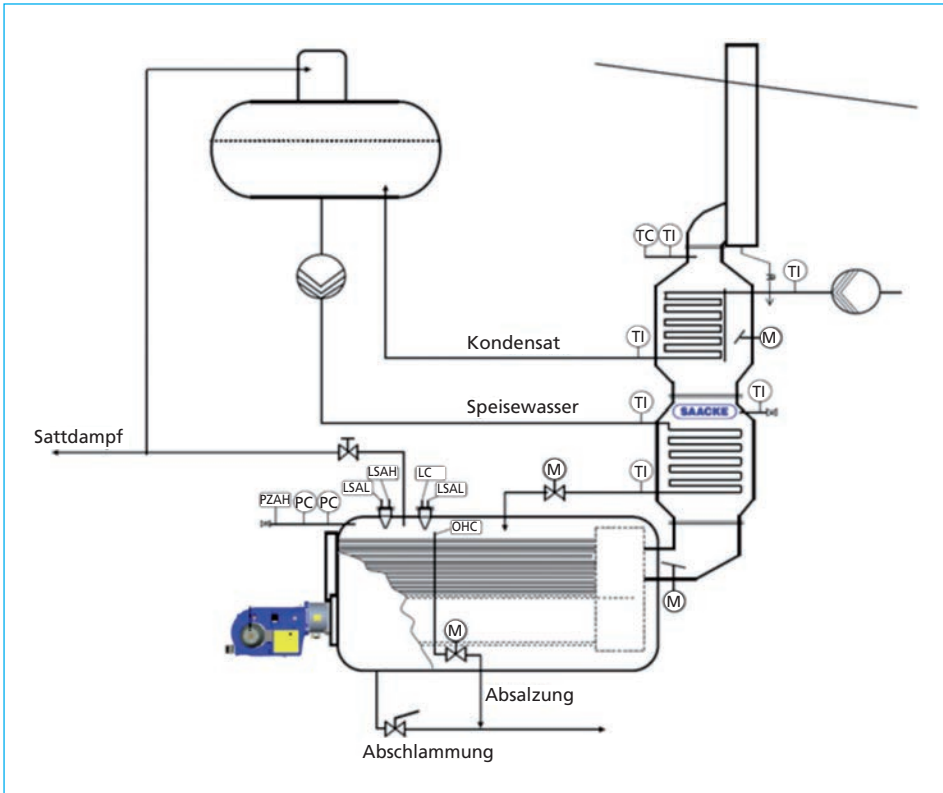


Bild 10: Abwärmenutzung Economiser und Brennwertwärmetauscher

Um die Menge des Abgases zu verringern, bietet sich eine O<sub>2</sub>- bzw. CO-Regelung an. Um saisonale Schwankungen der Verbrennungsluftdichte auszugleichen, werden konventionelle Anlagen mit einem recht hohen Luftüberschuss betrieben. Durchaus realistisch ist eine Temperaturdifferenz von 50 K bei einem Vergleich zwischen einem heißen Sommertag und einem kalten Wintertag. Die Luftdichte variiert in diesem Fall um etwa 15 %. Da Gebläse volumetrisch arbeiten, fördert das Gebläse deshalb im Winter 15 % mehr Luft zur Verbrennung und erhöht die Abgasmenge signifikant. Diese unnötig hohe Luftmenge führt dazu, dass sich die Abgasverluste von etwa 10 % auf etwa 11,5 % erhöhen. Eine O<sub>2</sub>- bzw. CO-Regelung überwacht die zugeführte Luftmenge kontinuierlich und passt sie den klimatischen Verhältnissen an, so dass sich diese Verluste eliminieren lassen.

Die Speiswasser-Aufbereitung ist neben der automatischen Absalzregelung ein wichtiger Baustein, um Speiswasserverluste zu minimieren. So werden zum

Beispiel bei einer herkömmlichen Dampferzeugeranlage mit 10 MW Leistung und einer Kondensatrückführungsrate von nur 50 % bei einer Wasserhärte von 400  $\mu\text{S}$  und 5.000 Betriebsstunden jährlich 3.250 t heißes Wasser ausgeschleust.

$$6,5 \text{ t/h} \cdot 5.000 \text{ h} \cdot \frac{400 \mu\text{S}}{4.000 \mu\text{S}} = 3.250 \text{ t}$$

Dies entspricht bei einer Wassertemperatur von 180 °C etwa 600 MWh pro Jahr – und stellt eine erhebliche Energiemenge dar, die sich mit einer verbesserten Wasseraufbereitung deutlich verringern lässt.

## 5. Energieeinsparmöglichkeiten bei Kesselanlagen durch eine Optimierung der Regelung

Wenn Feuerungsanlagen unterhalb ihrer Minimallast betrieben werden, hat das eine Reihe von Neustarts und damit erhebliche Durchlüftverluste zur Folge. Ähnlich verhält es sich bei einer schlecht angepassten Reglereinstellung des Brenners, bei der der Wärmeerzeuger zu häufig taktet. Hier lassen sich die unnötigen Neustarts mit einer Erweiterung des Regelbereiches oder einer optimierten Reglereinstellung minimieren. Bild 11 zeigt qualitativ den Verlauf des Brennstoffnutzungsgrades bei sinkender relativer Brennerleistung.

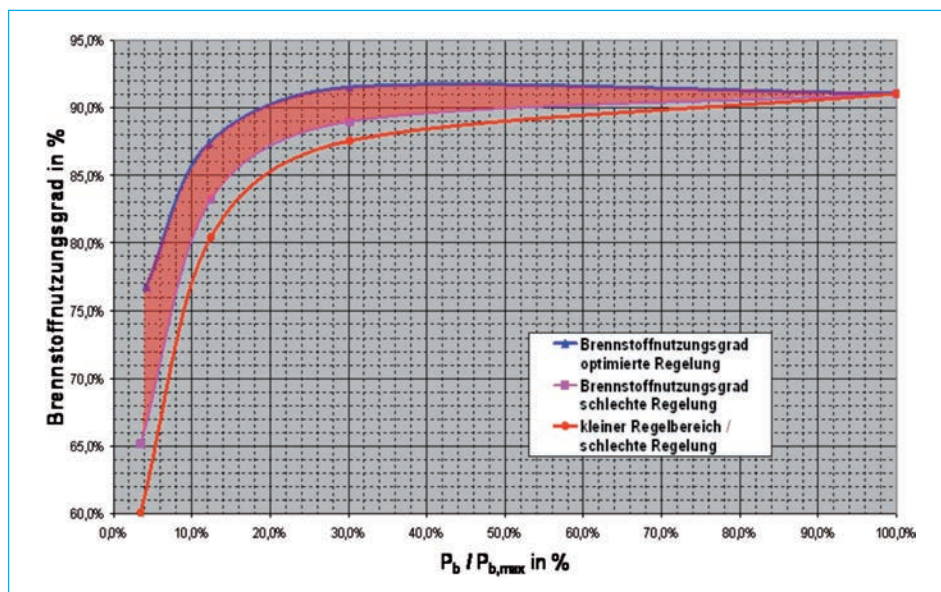


Bild 11: Brennstoffnutzungsgrad in Abhängigkeit vom Arbeitsbereich des Kessels

Bild 11 macht deutlich, wie stark der Brennstoffnutzungsgrad mit abnehmender relativer Belastung des Wärmeerzeugers abnimmt. Die Kurve endet an einen Punkt, bei dem der Wärmeerzeuger einen Brennstoffnutzungsgrad von Null

hat – hier wird die eingebrachte Brennstoffenergie nur noch verwendet, um die Verluste zu decken. Es ist unschwer zu erkennen, wie positiv der Einfluss einer optimierten Regelung auf den Brennstoffnutzungsgrad ist.

Die Bilder 12 und 13 zeigen die Verluste von Wärmeerzeugern mit unterschiedlichen Betriebsprofilen und machen ebenfalls deutlich, wie sehr eine verbesserte Regelung den Brennstoffnutzungsgrad steigert.

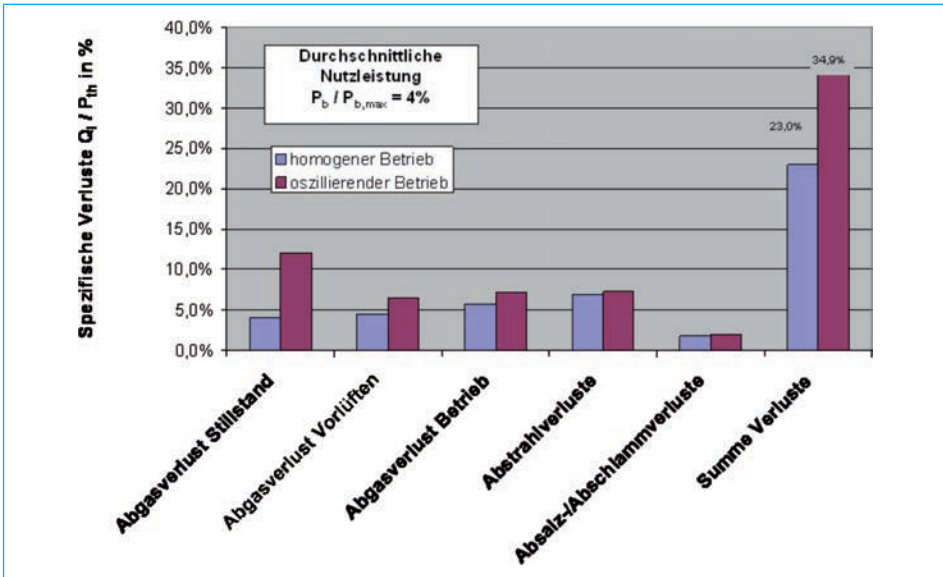


Bild 12: Verluste eines Kessels bei sehr geringer Auslastung

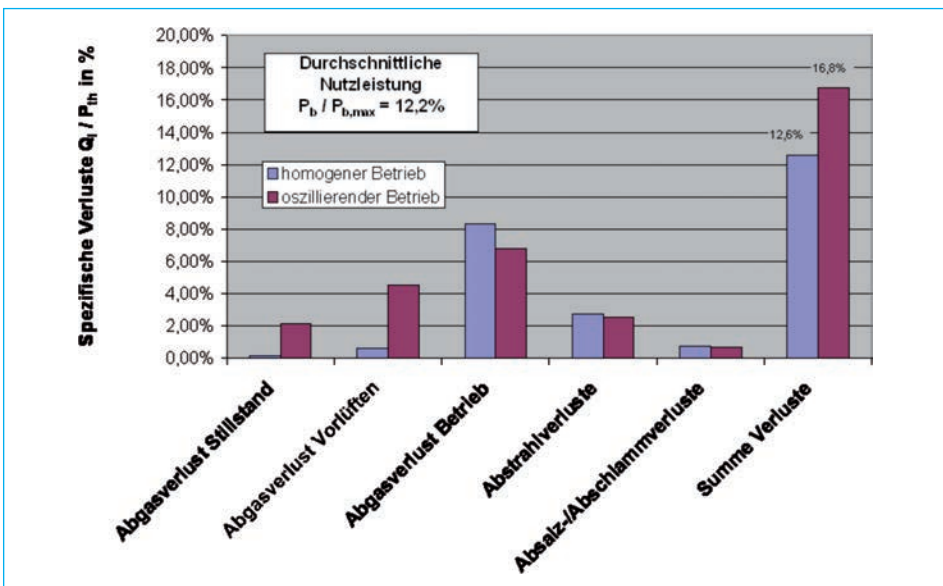


Bild 13: Verluste eines Kessels bei geringer Auslastung

Hierbei werden zwei Fälle behandelt: ein Wärmeerzeuger mit geringer durchschnittlicher Auslastung (aber noch oberhalb der Minimallast) und ein Wärmeerzeuger mit sehr geringer durchschnittlicher Auslastung (unterhalb der Minimallast). Gerade beim letztgenannten Fall geht durch die ständigen Anfahrvorgänge eine große Menge der Energie verloren, die Verluste steigen von 23 % auf 34 %.

## 6. Beispiele von Energieeinsparmöglichkeiten

Die beiden folgenden Beispiele zeigen den entscheidenden Einfluss der genauen Analyse des Betriebsprofils auf Investitionsentscheidungen bei einer Modernisierung.

### Beispiel 1

Hier wurde der Öl- gegen einen Gasbrenner ausgetauscht und die Feuerung um einen Abgaswärmetauscher ergänzt. In der Folge verbessern sich die NO<sub>x</sub>-Emissionswerte deutlich, die Effizienz der Kesselanlage steigt erheblich.

Die Speisewasservorwärmung arbeitet in diesem Fall zweistufig: Der direkt hinter dem Dampfkessel angeordnete Economizer entzieht dem Abgas in einem ersten Schritt Wärme und senkt die Abgastemperatur auf etwa 120 °C ab. Eine zweite Stufe kondensiert Teile dieses Abgases und gewinnt noch mehr Wärme zurück. Diese Brennwerttechnik ist besonders geeignet, wenn Wärme auf niedrigem Temperaturniveau, z.B. bei der Vorwärmung von Frischwasser, genutzt werden kann.

Die Tabelle 3 zeigt, dass Schadstoffemissionen und Verluste deutlich sinken.

Tabelle 3: Gegenüberstellung von Öl- und Gasbrenner

Vergleich	Einheit	vor Modernisierung	nach Modernisierung
Brennertyp		Rotationszerstäuber-Ölbrenner	Gasbrenner
Brennerleistung	kW	4.000	3.800
NO <sub>x</sub> -Emission	mg/Nm <sup>3</sup>	250 – 350	70 – 96
Abgastemperatur	°C	270	60
Abgasverluste	%	13,6	1,5
wasserseitige Verluste	%	1,5	0,5
Kesselwirkungsgrad	%	84,9	98

Bei einer jährlichen Betriebszeit von 6.000 h/a werden die Abgasverluste um 1.420.000 kWh/a reduziert, wodurch 142.000 Nm<sup>3</sup>/a Erdgas und 2.440 t/a CO<sub>2</sub> eingespart werden.

Die Ersparnisse aus dem geringeren Brennstoffbedarf sorgen für eine Amortisationszeit von 4,5 Jahren – bei derzeitigen Brennstoffkosten. Darüber hinaus steigt der Kesselwirkungsgrad um mehr als zehn Prozent, sodass die Schadstoffemissionen in der Summe deutlich sinken.

## Beispiel 2

Dieses Beispiel zeigt eine Anlage, deren Dampfkessel bereits mit einem Economizer ausgerüstet war. Hier konnte mithilfe eines neuen Luftvorwärmers die Energieeffizienz nochmals deutlich gesteigert werden. Dabei wird die Verbrennungsluft in einem Abgaswärmeübertrager durch den Abgasstrom vorgewärmt. Diese Energie wird der Feuerung zugeführt, so dass sich die Abgastemperaturen und damit die Abgasverluste reduzieren.

Die Tabelle 4 gibt einen Überblick über die mit dem Luftvorwärmer erreichten Verbrennungsluft- und Abgastemperaturen und die daraus resultierenden Brennstoffeinsparungen. Sie zeigt, dass die Abgastemperaturen im gesamten Lastbereich unter 70 °C liegen.

Tabelle 4: Überblick über Brennstoffeinsparungen durch Einsatz eines Luftvorwärmers

Leistung Brenner	Temperatur Luft	Temperatur Abgas	Leistung Luvo	Betriebszeit	Einsparung
MW	°C	°C	kW	h/a	kWh/a
2,7	75	68	45	2.000	90.000
4,4	75	69	73	2.000	146.000
6,9	77	69	119	2.000	238.000
<b>Summe</b>					<b>474.000</b>

In Summe ergeben sich schon bei kleinen Anlagen so erhebliche Einsparungen, die eine Investition wie hier jederzeit rechtfertigen.

## 7. Fazit

In den kommenden Jahren wird ein großer Teil der industriellen Wärmeerzeuger in Deutschland modernisiert werden. Diese Maßnahmen werden vermutlich auf der Basis bisher verwendeter Kennzahlen durchgeführt – obwohl diese nicht auf das individuelle Betriebsprofil eingehen. Vielmehr bilden der Feuerungstechnische Wirkungsgrad und der Kesselwirkungsgrad nur das Verhalten kontinuierlich betriebener Anlagen ab und eignen sich nicht, um die Schwankungen im Betrieb zu erfassen.

Im schlimmsten Fall können diese Zahlen zu Fehlinvestitionen führen, weil das reale Betriebsverhalten der Anlage nicht darin erfasst ist. Der Brennstoffnutzungsgrad als dritte Kennzahl ermöglicht genau diese reale und dynamische Betrachtung der Anlage. Mit dieser auf den ersten Blick aufwändigeren Betrachtung ist dann eine qualifizierte Bewertung von kostenintensiven Veränderungen möglich. Zudem stehen inzwischen kostengünstige und zuverlässige Werkzeuge bereit, die diese Kenngröße aus dem aktuellen Betriebsprofil berechnen.

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
A	Oberfläche	m <sup>2</sup>
h	spez. Enthalpie	kJ/kg
H	Enthalpie	kJ
$\dot{H}$	Enthalpiestrom	kJ/s
L	Leitfähigkeit	μS
$\dot{m}$	Massenstrom	kg/h
n <sub>Durchlüft</sub>	Frequenz der Durchlüftvorgänge	1/h
O <sub>2,tr</sub>	Sauerstoffkonzentration trocken	Vol.-%
$\dot{Q}_o$	Oberflächenverluste	kW
R <sub>FF</sub>	Rückföhrfaktor	–
R <sub>R</sub>	Rückföhrtrate	–
t <sub>Durchlüft</sub>	Durchlüftzeit	s
T	absolute Temperatur	K
$\dot{V}$	Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h
x	absoluter Verlust	kJ
X	relativer Verlust	%
α	Wärmeübergangskoeffizient	kW/m <sup>2</sup> K
ε <sub>o</sub>	Emissivität	–
η <sub>FT</sub>	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	%
η <sub>K</sub>	Kesselwirkungsgrad	%
ρ	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
θ	Temperatur	°C

### Indice

A	Abgas
Absalz	Absalzen
Abschlamm	Abschlammern
Br	Brennstoff
Dampf	Dampf
K	Kessel
L	Luft
max	maximal
Speisewasser	Speisewasser
U	Umgebung



**Konstanten**

$C_1$	Brennstoffspezifische Konstante	–
$C_2$	Brennstoffspezifische Konstante	–
$c_{p,l}$	spez. Wärmekapazität der Luft	1 kJ/kg K
$\varepsilon_r$	Stefan Boltzmann Konstante	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Energie aus Abfall** – Band 8

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Michael Beckmann.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011

ISBN 978-3-935317-60-3

ISBN 978-3-935317-60-3 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky

Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2011

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,

Dipl.-Ing. Ernst Thomé, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc. und Dr.-Ing. Stephanie Thiel

Erfassung und Layout: Janin Burbott, Dipl.-Kffr. Elke Czaplewski, Petra Dittmann,

Martina Ringgenberg, Ginette Teske

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.